

基于渐变折射率的太赫兹人工表面等离子激元片上透镜特性

苏晓强¹, 张亚伟², 邓富胜¹, 许全^{3*}, 韩家广^{3**}

¹山西大同大学物理与电子科学学院微结构电磁功能材料省市共建山西省重点实验室, 山西 大同 037009;

²山西大同大学云冈学院, 山西 大同 037009;

³天津大学精密仪器与与光电子工程学院太赫兹研究中心, 天津 300072

摘要 借助于结构化的金属/介质界面所形成的人工表面等离子激元, 能够将太赫兹场束缚在亚波长量级, 同时利用单元结构对几何参数的色散特性, 可以在二维尺度上操纵太赫兹波, 为集成化、小型化片上太赫兹功能器件的发展提供了解决途径。利用立体金属柱子结构的色散特性构建二维渐变折射率透镜, 在此基础上设计平面望远镜、波导耦合器、双功能透镜等二维太赫兹人工表面等离子激元传输调控器件, 并通过电磁仿真分析每种功能器件的工作性能。本工作不仅丰富了太赫兹表面波调控器件家族, 并有望进一步发展表面等离子激元链路的太赫兹片上系统。

关键词 太赫兹; 人工表面等离子激元; 渐变折射率; 片上透镜

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231273

Characteristics of Terahertz Spoof Surface Plasmonic Lens On-Chip Based on Gradient Refractive Index

Su Xiaoqiang¹, Zhang Yawei², Deng Fusheng¹, Xu Quan^{3*}, Han Jianguang^{3**}

¹College of Physics and Electronic Science, Shanxi Province Key Laboratory of Microstructure Electromagnetic Functional Materials, Shanxi Datong University, Datong 037009, Shanxi, China;

²School of Yungang Ology, Shanxi Datong University, Datong 037009, Shanxi, China;

³Center for Terahertz Waves and College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The terahertz (THz) field can be confined and manipulated at the sub-wavelength level using spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) formed on structured metal/dielectric interfaces. Furthermore, it is feasible to manipulate THz waves on a two-dimensional (2D) scale by utilizing the dispersion properties of the unit structure on the geometrical parameters, which provides a solution for the development of integrated and miniaturized on-chip THz multi-functional devices. This study proposes a 2D gradient refractive index lens based on the dispersion characteristics of the metallic pillar structure. THz SSPP devices were designed according to the proposed design scheme for manipulating the propagation, such as flat telescopes, waveguide couplers, and dual-function lenses, and the working performance of each functional device was analyzed through electromagnetic simulations. This study not only enhances the different THz surface wave control devices but can also help develop THz on-chip systems further based on surface plasmon polariton chains.

Key words terahertz; spoof surface plasmon polaritons; gradient refractive index; on-chip lens

1 引言

表面等离子激元(SPPs)是自由空间波被耦合成一

种沿金属和电介质界面传播的特殊电磁模式, 它是一种束缚态的表面波, 并在垂直于传播面方向上的振幅呈指数式衰减, 因而能够在亚波长尺度下操控电磁波。

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-05-23; 录用日期: 2023-06-30; 网络首发日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(62005193, 61935015, 61805129)、山西省基础研究计划项目(202203021211328)、山西大同大学基础青年科研基金项目(2022Q5)、山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(20230037)

通信作者: *quanxu@tju.edu.cn; **jiaghan@tju.edu.cn

SPPs 是一种在可见光波段下才能观察到的现象,其独特的性能使得它在超分辨成像技术、亚波长光刻技术、高集成光信息处理技术等方面具有巨大的应用前景,同时基于 SPPs 的光子回路有望打破传统微电子技术,在提高信息处理速度、存储密度和片上可集成度等方面所面临的发展瓶颈,成为新一代信息通信的新型载体^[1-4]。然而,光波段下 SPPs 传输损耗高且亚波长结构加工难度大等问题一直影响着该技术的发展。由于在低频波段下金属的行为接近于完美电导体(PEC),平坦金属表面对 SPPs 的强束缚特性在太赫兹(THz)系统中很难实现。2004 年,英国帝国理工大学的 Pendry 等^[5]提出将平面金属进行结构化设计后在 THz 波段下所支持的人工表面等离子激元(SSPPs),同样可以实现类似光波段 SPPs 的色散关系和强束缚特性,并且其色散特性能够通过改变结构的几何参数来调控^[5]。同时,金属对 THz SSPPs 的电磁能量损耗较低,能够实现长距离的传输。THz 波段的波长较长,对于其组成 SSPPs 的亚波长单元结构利用传统光刻工艺技术较容易实现,因此发展 THz SSPPs 及其相关功能器件,进而搭建基于表面等离子激元链路的 THz 片上系统,被认为是实现小型紧凑并且多功能复用 THz 系统的一个重要途径,并有望应用于无线通信 5G 技术的开发以及未来 6G-THz 通信技术的探索^[6-8]。

在基于 SSPPs 的功能器件研究中,通常在金属表面一维或二维方向上刻蚀周期性的凹槽或者构建金属柱子来实现对 SSPPs 的强束缚和长距离传输。英国巴斯大学 Maier 等^[9]利用不同凹槽的结构实现了 THz SSPPs 在金属柱和二维方形周期孔结构金属表面的低损耗且接近直角转弯的传输,为长距离传输的波导器件提供重要的设计思路。西班牙马德里自治大学 Martin-Cano 等^[10]利用呈阶梯状排列的立体多米诺金属柱子实现了对 SSPPs 传输过程中的能量聚焦,并深入分析了单元结构谐振模式间的相互转换。东南大学的崔铁军院士等^[11-15]在 2013 年提出柔性、可弯曲、可共形、工艺简单的超薄 SSPPs 波导结构,利用对称渐变金属凹槽结构很容易实现从同轴波导所支持的导波到 SSPPs 的高效转化,并在此基础之上开展了一系列微波波段下 SSPPs 的相关研究工作。天津大学的太赫兹研究中心利用立体方形金属柱子结构实现了 THz SSPPs 在一维波导结构上的高效传输,并设计了如分束器、耦合器、逻辑门等一维片上功能器件^[16-20]。近年来,国内外多个课题组在操控 SSPPs 及表面波传输方面都开展了相关研究工作,其主要成果集中在空间光与表面波之间的高效转换以及基于相位突变的方法控制 THz 波段下表面波的激发,而涉及 THz SSPPs 的操控及相关功能器件的研究工作开展得并不多,相关研究集中在一维波导结构的设计,而对 THz SSPPs 在二维传输过程中的调控还鲜有报道。

本文利用亚波长金属柱子结构对 THz SSPPs 的

强束缚特性,通过本征模数值计算单元周期中立体金属结构的不同占空比下的色散曲线,分析其几何参数与有效折射率的对应关系,基于渐变折射率的原理设计并实现了 THz SSPPs 片上自聚焦透镜。该透镜可实现对 THz SSPPs 在二维尺度上的高效波前操控,基于该透镜进一步设计了平面望远镜、波导耦合器和多功能透镜等片上功能器件。仿真结果表明,每种功能器件都可以很好地完成对 THz SSPPs 在二维平面传输过程中的调控。

2 基本原理

2.1 单元结构仿真及色散特性

根据麦克斯韦方程组和边界条件,可以很容易求得金属-介质界面处表面等离子激元的色散关系 $k_{sp} =$

$$k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}}。其中:k_{sp} 代表表面等离子激元的波矢大小,$$

k_0 代表真空中的波矢大小; ϵ_d 和 ϵ_m 分别代表介质和金属的相对介电常数。根据 Drude 模型可知,在低频段,金属的介电常数 ϵ_m 非常大,远远大于一般介质的介电常数 ϵ_d ,所以在低频段下 $k_{sp} \approx k_0$,即表面等离子激元的波矢约等于光在空气中的波矢,意味着表面等离子激元演变成掠入射的光场,无法形成有效的束缚性光场。通过在平面金属上加工周期性的结构,如凹槽或者凸起的柱子,来改变结构金属区域的有效等离子频率,使其往低频靠拢,进而实现 $k_{sp} > k_0$,这样使得在低频波段下也能实现类似光波段表面等离子激元的特性。因此,构建图案化的金属结构是形成人工表面等离子激元的关键。

所提亚波长立体金属柱子单元结构示意图如图 1(a) 所示,整个结构的横截面为正方形,保持周期 $p=80 \mu\text{m}$ 和高度 $h=70 \mu\text{m}$ 不变,利用商业软件 CST Microwave Studio 的本征模式求解器(the eigen-mode solver)得到在改变边长 a 的情况下,单元结构在第一布里渊区基模的色散关系,具体如图 1(b) 所示,在 THz 波段下金属的材质可用 PEC 来代替,单元结构沿 x 和 y 方向上设置为周期性边界条件, z 方向上设置为开放边界条件,分别仿真边长 $a=34, 54, 74 \mu\text{m}$ 时的色散曲线,图中 light line 为光在真空中的传输特性。根据色散关系曲线,单元结构的有效折射率可由公式 $n_{\text{eff}} = k_{sp}/k_0 = \varphi_{\text{phi}}/(p \cdot k_0)$ 计算。其中, φ_{phi} 为表面等离子激元的传输相位。图 1(c) 给出了在 0.75 THz 频率下有效折射率 n_{eff} 随边长 a 的变化曲线。可以看出,边长 a 的变化范围在 $34 \sim 76 \mu\text{m}$ 时对应有效折射率 n_{eff} 的变化范围为 $1.52 \sim 1.01$,即有效折射率 n_{eff} 与 a 成反比。

2.2 基于渐变折射率的自聚焦透镜

渐变折射率透镜(gradient index lens)的折射率分布会随着空间位置的变化发生连续的变化,从而能够消除球差和像差等光学缺陷,提高成像质量。此外,渐变折射率透镜还可以实现更加紧凑和轻量化的光学系

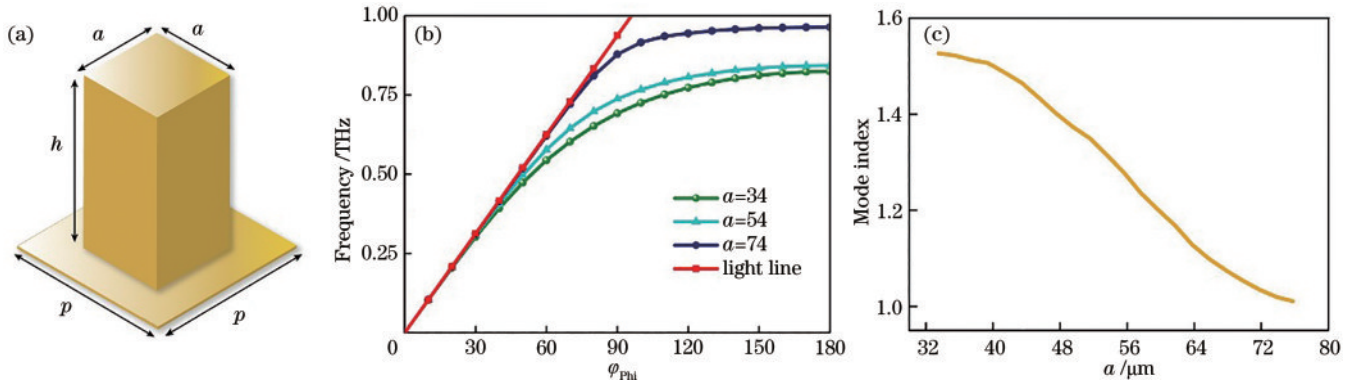


图 1 立体金属柱子单元结构及参数。(a)单元结构的三维图;(b)单元结构在第一布里渊区基模的色散关系;(c)0.75 THz 频率下有效折射率 n_{eff} 随边长 a 的变化曲线

Fig. 1 Structure diagrams and parameters of stereo metallic pillar: (a) Three-dimensional diagram of unit cell; (b) dispersion relation for the fundamental mode in the first Brillouin zone; (c) effective index n_{eff} at 0.75 THz with the lateral width a

统设计^[17,21]。图 2(a)给出了基于立体金属柱子结构的片上渐变折射率透镜示意图,该透镜在 x 轴方向上保持折射率分布不变,在 y 方向上的折射率呈现的分布为

$$\begin{cases} n(y) = n_{\text{max}} \sqrt{1 - \alpha^2 y^2} \\ \alpha = \frac{1}{W} \sqrt{\left(\frac{n_{\text{min}}}{n_{\text{max}}}\right)} \end{cases}, |y| \leq W, \quad (1)$$

式中: n_{min} 和 n_{max} 分别为透镜中心和边缘最大和最小的折射率值; α 为渐变折射率透镜呈现抛物线型分布的曲率; W 为透镜在 y 方向上的半宽度。从射线光学的角度出发,该渐变折射率透镜对入射的平面波进行自聚焦,焦距 $L = \pi/2\alpha$ 。设定 $n_{\text{max}} = 1.52$ 、 $n_{\text{min}} = 1.01$ 、 $W = 1520 \mu\text{m}$,透镜在 y 方向上的折射率分布如图 2(a)中玫红色曲线所示,根据色散关系将不同边长的方形金属柱子按照折射率分布依次排列,整个透镜的尺寸约为 $5.2 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 。在仿真设计中,所有金属的

柱子结构以厚度为 200 nm 的金属平板作为基底,通过背面入射 THz 平面波到金属平板上的矩形狭缝来激发 THz SSPPs,设定金属矩形狭缝宽度为 $40 \mu\text{m}$ 、周期为 $400 \mu\text{m}$,经过相干作用后能够产生中心频率为 0.75 THz 且波前平坦的 THz SSPPs。图 2(b)显示了 THz SSPPs 的电场分量 E_z 在距离柱子高度为 $60 \mu\text{m}$ 的 xy 截面和在传播方向上 xz 截面的场分布仿真结果。可以看出,THz SSPPs 在穿过渐变折射率透镜的区域过程中,波前形状由平坦型逐渐变成会聚型,最终聚焦到傅里叶平面上的一个点,然后波前又逐渐变成平坦型,这符合渐变折射率透镜对入射波的周期性波前调制的特性,同时 THz SSPPs 在传播过程中始终很好地束缚在金属柱子结构顶部的亚波长尺度内。此外,根据场分布的仿真结果还可以得到渐变折射率透镜的焦距,约为 2.68 mm ,与理论计算所得的 2.85 mm 基本一致。

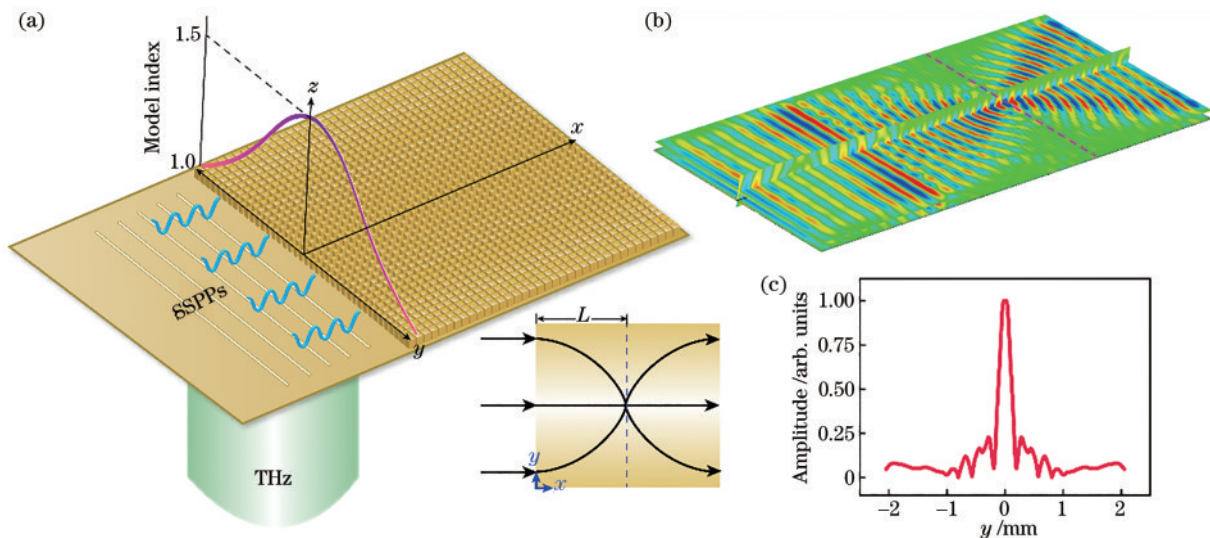


图 2 片上渐变折射率透镜示意图及工作特性。(a)结构示意图及仿真设置;(b)电场分量 E_z 在 xy 和 xz 截面的场分布;(c)焦点位置处电场归一化振幅随 y 坐标的变化曲线

Fig. 2 Scheme and characteristics of on-chip lens based on gradient index: (a) Structure diagram and simulation result; (b) the electric-field E_z distribution in xy and xz cross-section; (c) the normalized electric-field amplitude along the y direction at the focus

图 2(c)显示了在焦点位置处电场归一化振幅随 y 坐标的变化曲线,其半峰全宽(FHWM)大约为 $243 \mu\text{m}$ 。

在利用立体金属柱子设计片上渐变折射率自聚焦透镜的基础之上,还设计了更为复杂的片上功能器件,以应对多种场景的需求,具体包括平面望远镜、波导耦合器和双功能透镜。

3 结果分析与讨论

3.1 平面望远镜

平面望远镜是由两个不同宽度的渐变折射率透镜沿 x 轴紧密相连构成的,如图 3(a)所示,两个透镜的宽度分别是 $W_1=1520 \mu\text{m}$ 、 $W_2=720 \mu\text{m}$,其各自在 x 轴方向上的长度等于每个透镜的焦距。为了降低界面的反射影响,这个共焦透镜组的外边缘用最小折射率所

对应的金属柱子($a=76 \mu\text{m}$)来填充。图 3(b)给出 0.75 THz 频率下 THz SSPPs 的电场分量 E_z 在距离柱子高度为 $60 \mu\text{m}$ 的 xy 截面上的场分布仿真结果,图中两个虚线框分别为两个透镜所在的区域。可以看到,由同样等周期金属矩形狭缝激发的 THz SSPPs 先经过大透镜、宽度为 $2W_1$ 的平坦波前逐渐会聚到一点,而后经过小透镜,波前又逐渐发散并再次变为平坦,但此时波前的宽度变为 $2W_2$,波前呈现的是缩放状态,转化比例为 W_2/W_1 。相似地,如果 THz SSPPs 先经过小透镜而后经过大透镜,此时波前则呈现的是放大状态。图 3(c)为在入射端口、焦点和出射端口等 3 个位置处电场归一化振幅随 y 坐标的变化曲线,3 条曲线的线型与近场分布中的表现相吻合,出射端与入射端的半峰全宽比值为 0.47 ,与理论设计的结果一致。

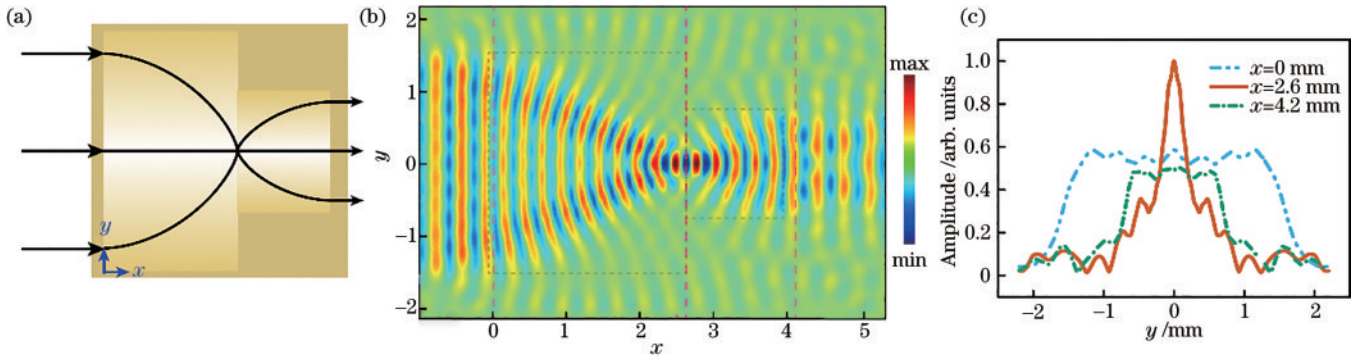


图 3 平面望远镜结构示意图及工作性能。(a)工作示意图;(b)电场分量 E_z 在 xy 截面的场分布;(c)3 条虚线位置处电场归一化振幅随 y 坐标的变化曲线

Fig. 3 Schematic diagram and characteristics of planar telescope: (a) Schematic diagram; (b) the electric-field E_z distribution in xy cross-section; (c) the normalized electric-field amplitude along the y direction at the three dashed line position

通过旋转周期性的金属矩形狭缝获得激发的 THz SSPPs 与水平线成一定的角度,图 4 为所设计的平面望远镜系统在 THz SSPPs 与水平线成 10° 倾斜入射时的示意图及性能。可以看到,虽然波前聚焦的传播轨迹和焦点在竖直方向的位置都发生了偏移,但出射的 THz SSPPs 仍能保持平坦的波前,而且缩放比例保持不变,同时出射方向与入射方向位于水平基准线

的同侧。当入射的 THz SSPPs 倾斜角度进一步增大,直到焦点位置在 y 方向上超出了后面第 2 个透镜的边缘时,就会破坏这个透镜的准直效果,导致 THz SSPPs 无法正常以平坦的波前出射。因此,该平面望远镜正常工作需要满足的条件是对于激发的 THz SSPPs 与水平线所成的角度小于等于 10° ,这个角度还与两个透镜的宽度有关。

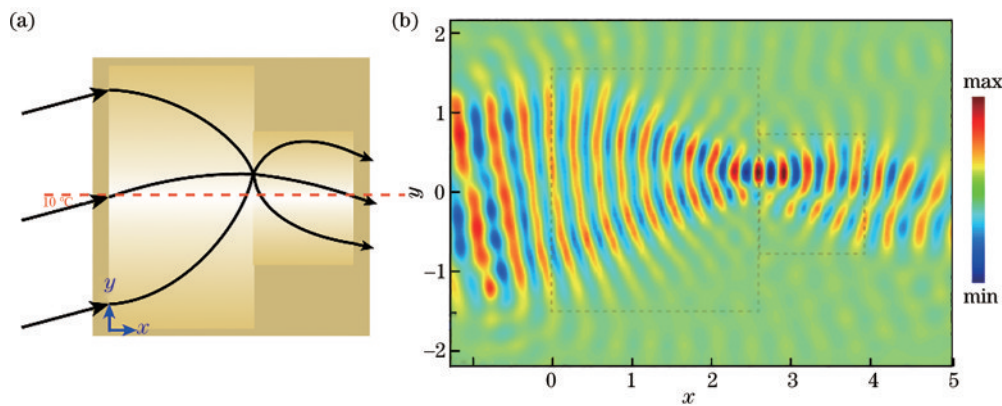


图 4 平面望远镜结构示意图及斜入射工作性能。(a)工作示意图;(b)电场分量 E_z 在 xy 截面的场分布

Fig. 4 Schematic diagram and characteristics with oblique incidence of planar telescope. (a) Schematic diagram; (b) the electric-field E_z distribution in xy cross-section

3.2 波导耦合器

现阶段通常利用超表面的亚波长单元结构形成某种相位梯度的设计,使自由空间光耦合到表面等离激元,并且能够形成特定的传输波前。耦合器作为两种形态波束的过渡或者转化元件,是片上光学系统的重要组成部分^[22]。在实际的太赫兹片上系统设计中通常也需要将 THz SSPPs 耦合到直波导结构上,传统的耦合器通常采用漏斗型结构设计,将 THz SSPPs 逐渐压缩到单个波导结构上,这种方法不但耦合效率较低,而且形式单一,不利于组建多通道的耦合输出。利用渐变折射率透镜作为耦合器[图 5(a)],先将 THz SSPPs 会聚到焦点位置,然后使用与邻近金属柱子结构几何参数相同的单元作为直波导的组成元素,这样就将 THz SSPPs 由波前平坦的宽波束耦合到波导模式的

窄波束。渐变折射率透镜的参数配置以及 THz SSPPs 的激发设置都与前面介绍的相同,图 5(b)显示了 0.75 THz 频率下 THz SSPPs 的电场分量 E_z 在 xy 截面的场分布仿真结果。可以看出,波前平坦的 THz SSPPs 被渐变折射率透镜逐渐会聚到透镜的中心,由于组成直波导的金属柱子单元结构与透镜中心金属柱子的几何参数一致,保证了阻抗匹配,即二者的有效折射率相等,从而使 THz SSPPs 从透镜耦合到直波导的效率达到最大。图 5(c)显示了在场分布结果中 $y=0$ 的传播路径上电场归一化振幅随 x 坐标的变化曲线。可以看出,由单行金属柱子所组成的直波导对传输的表面电磁场具有非常高的束缚性,传播损耗约为 5.7 dB/cm。当水平坐标 $x > 6$ mm 时,没有了金属柱子对 THz SSPPs 的传输支撑和束缚,场强迅速衰减。

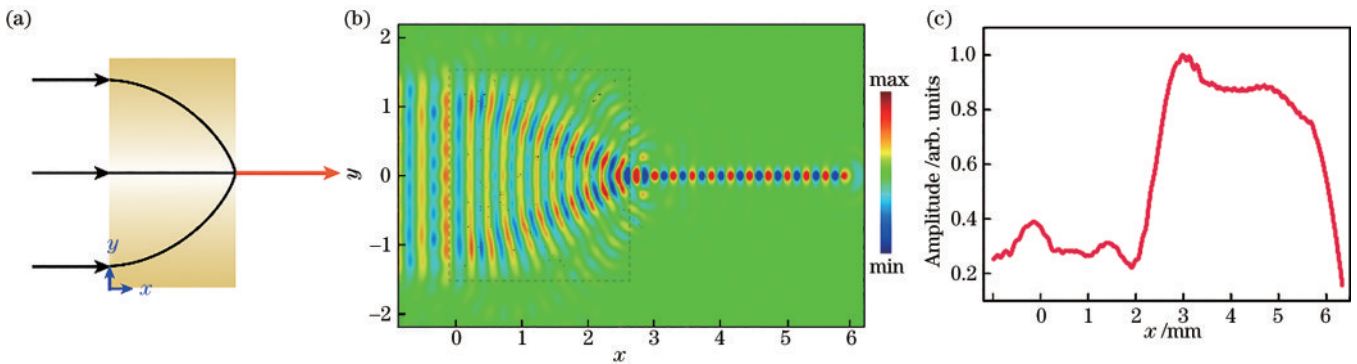


图 5 波导耦合器结构示意图及工作性能。(a)工作示意图;(b)电场分量 E_z 在 xy 截面的场分布;(c) $y=0$ 的传播路径上电场归一化振幅随 x 坐标的变化曲线

Fig. 5 Schematic diagram and characteristics of waveguide coupler. (a) Schematic diagram; (b) the electric-field E_z distribution in xy cross-section; (c) the normalized electric-field amplitude along the x direction on the propagation path of $y=0$

图 6 为所设计的渐变折射率透镜对两束分别与 x 轴成 30° 和 -30° 的 THz SSPPs 同时会聚的效果,这两束斜入射的波在水平方向上保持与正入射时相同的焦距,而焦点则在 y 方向上对称地分布在 x 轴的两侧,偏移的量与斜入射的角度成正比,在每个焦点后

紧接由单排金属柱子组成的直波导,因而 THz SSPPs 最终被耦合到两个直波导上。根据以上的设计思路,所提渐变折射率透镜能够同时实现 THz SSPPs 的多路耦合输出。此外,由光路可逆的原理可知,当 THz SSPPs 从直波导一侧馈入,那上述的整套

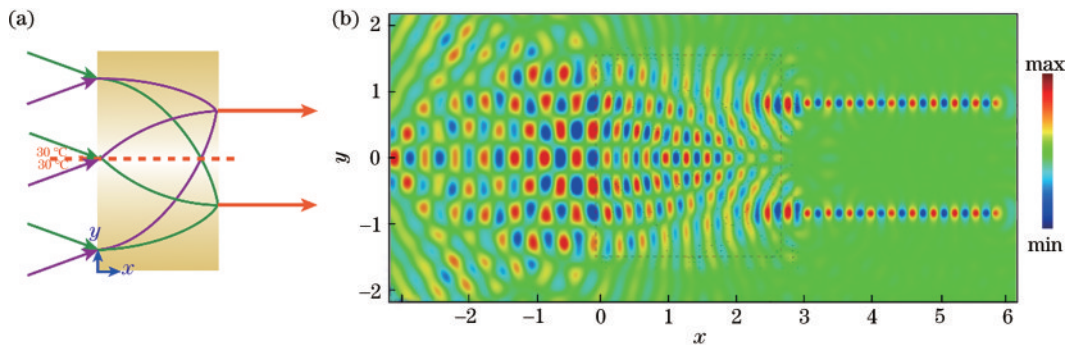


图 6 波导耦合器结构示意图及两路斜入射时工作性能。(a)工作示意图;(b)电场分量 E_z 在 xy 截面的场分布

Fig. 6 Schematic diagram and characteristics with two oblique incidence of waveguide coupler. (a) Schematic diagram; (b) the electric-field E_z distribution in xy cross-section

装置可以被用作一个分流器,即入射波束将在渐变折射率透镜的左侧分成两条 THz SSPPs,且分别与 x 轴成 30° 和 -30° 。这种多路复用的片上元件能够为无线信号和片上微处理器之间建立路由和数据交互的桥梁。

3.3 双功能透镜

如果将方形金属柱子结构的横截面设计成矩形,即在 x 和 y 轴两个方向上的边长不相等,单元结构的性能此时则表现为各向异性,那么就可以在同一块区域的两个方向上实现不同的功能,这对于表面等离子体链路在高度集成和信息交互方面具有非常重要的意义^[23]。因此,设计了一种 THz SSPPs 双功能透镜,把在 x 轴传播方向上的龙勃(Luneburg)透镜和在 y 轴传播方向上的鱼眼(Fisheye)透镜融合在一起,前者是将会聚的点源逐渐转化为波前平坦的波束从透镜另一端出射,而后者则是将点源从透镜入射端一侧重新聚焦到另一侧。这两种功能的透镜都具有圆对称性的折射率分布,相应的公式分别为:龙勃透镜, $n_r = \sqrt{2 - (r/R)^2}$,鱼眼透镜, $n_r = n_{\max} / [1 + (r/R)^2]$,其中, R 表示整个透镜的半径, r 表示透镜内部各点距圆心的径向距离, n_{\max} 为最大的折射率值。图 7 为 THz SSPPs 双功能透镜的设计示意图,金属柱子单元结构的周期 $p=80 \mu\text{m}$ 、高度 $h=75 \mu\text{m}$,通过调谐边长 a_x 和 a_y 分别在 $[34 \mu\text{m}, 76 \mu\text{m}]$ 范围内变化,根据色散关系曲线, 0.75 THz 频率下在 x 轴和 y 轴两个方向上的相应有效折射率 n_{eff} 的变化范围为 $[1.81, 1.02]$ 。按照每种功能透镜的折射率分布将对应几何参数的金属柱子放置在相应的位置上,整个圆形透镜的边缘用最小折射率所对应的金属柱子($a=76 \mu\text{m}$)来填充,整个双功能透镜的半径 R 为 2.4 mm 。利用金属弧形狭缝来将从背面入射的自由空间太赫兹波束转化为 THz SSPPs,弧形

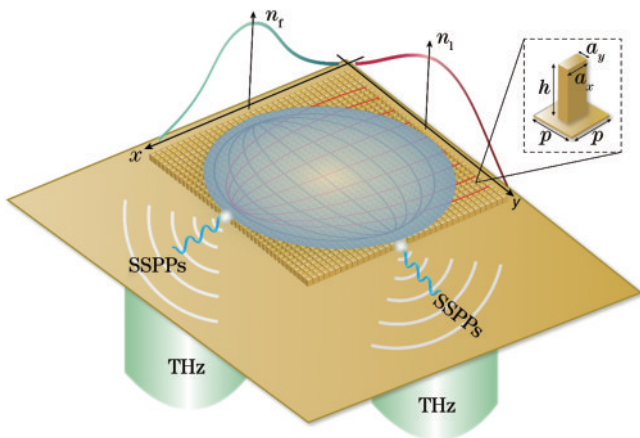


图 7 双功能透镜结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of dual-function lenses

狭缝的周期为 $400 \mu\text{m}$,宽度为 $40 \mu\text{m}$,圆心角为 60° ,弧形狭缝从外到内边长逐渐减小以此来让激发的 THz SSPPs 在 0.75 THz 频率下相干相长同时向圆心聚焦,直至在双功能透镜的入射端面处形成点源。图 8 为 THz SSPPs 的电场分量 E_z 在距离柱子高度为 $60 \mu\text{m}$ 的 xy 截面场分布的仿真结果。可以看出,图 8(a)中由弧形金属狭缝激发的 THz SSPPs 波前成会聚状直至形成点源,并在 x 轴方向上穿过双功能透镜区域过程中逐渐被准直成波前平坦的平行波束,而图 8(b)中 THz SSPPs 点源在 y 轴方向上穿过双功能透镜区域过程中先被准直然后又被会聚到一点,上述的场分布形象直观地证明了所设计的双功能透镜能够将龙勃和鱼眼透镜组合到同一块区域的正交方向上,而且在两个方向上的操控相对独立,串扰较小。

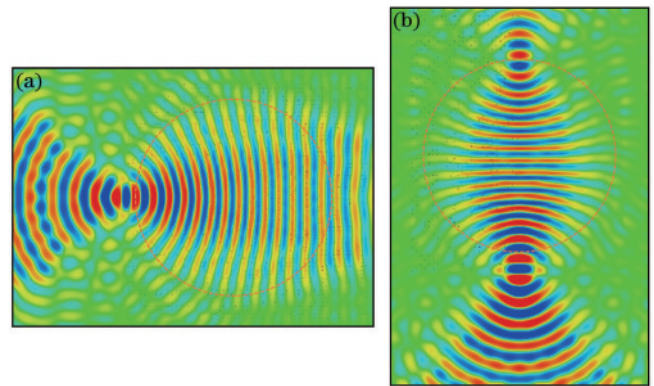


图 8 双功能透镜的工作特性。(a)龙勃透镜;(b)鱼眼透镜

Fig. 8 Characteristics of dual-function lenses. (a) Luneburg lens; (b) Fisheye lens

3.4 样品制备与工作带宽

在理论模拟中所用的立体金属结构,可以先在硅片上刻蚀出立体硅结构后在其表层蒸镀金属,而且金属的厚度大于趋肤深度,这样二者在性能方面是一样的。因而,整个加工过程可以分为两步:1)对高阻硅片进行深度刻蚀,可选用电感耦合式反应离子刻蚀(ICP RIE),保证刻蚀深度的同时确保刻蚀的边缘锐度;2)套刻蒸镀金属,为了减小刻蚀后的结构区域光胶的不均匀对曝光、显影的影响,采用负胶工艺,以确保作为激发源的光栅结构与立体硅阵列结构精确对准。其大致的加工流程图如图 9 所示。

本工作虽然选取 0.75 THz (对应波长 $400 \mu\text{m}$)作为工作频率,计算了不同边长 a 所对应的等效折射率,理论上说根据渐变折射率原理所设计的 3 种功能调控器件在 0.75 THz 频率的工作性能是最佳的,虽然其邻近的频段也能实现相应的功能,但性能表现较差,相应的参数(如透镜焦距)也会发生变化而且无法精确预估。

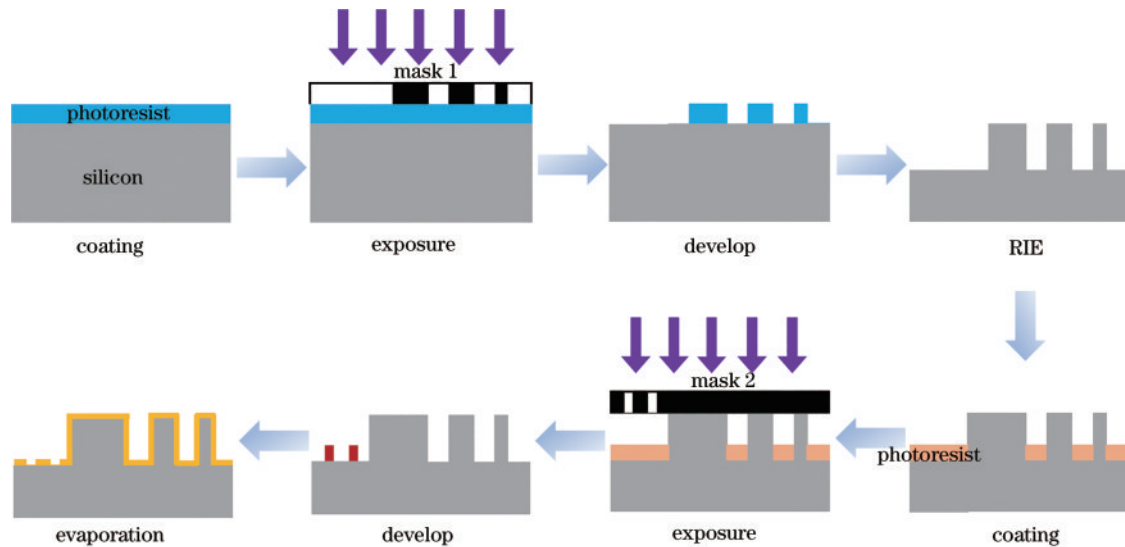


图 9 基于立体金属柱子功能器件的制备工艺流程图

Fig. 9 Fabrication process flow chart of functional devices based on metallic pillars

4 结 论

利用立体金属柱子结构作为 THz SSPPs 传输和调控的基本单元,证明了基于金属柱子结构的渐变折射率透镜不仅能实现对 THz SSPPs 的强束缚特性,而且还能实现 THz SSPPs 传输波前的有效调控。根据该设计思路,还设计了 3 种 THz SSPPs 功能器件,包括平面望远镜、波导耦合器和双功能透镜,虽然只给出了仿真结果,但具有非常高的实验可行性,有望应用于开发小型化和多功能的片上太赫兹系统。

参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Zia R, Schuller J A, Chandran A, et al. Plasmonics: the next chip-scale technology[J]. *Materials Today*, 2006, 9(7/8): 20-27.
- [3] Sorger V J, Oulton R F, Ma R M, et al. Toward integrated plasmonic circuits[J]. *MRS Bulletin*, 2012, 37(8): 728-738.
- [4] Melikyan A, Alloatti L, Muslija A, et al. High-speed plasmonic phase modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(3): 229-233.
- [5] Pendry J B, Martín-Moreno L, García-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847-848.
- [6] Liang Y, Yu H, Feng G Y, et al. An energy-efficient and low-crosstalk sub-THz I/O by surface plasmonic polariton interconnect in CMOS[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2762-2774.
- [7] Davis T J, Gómez D E, Roberts A. Plasmonic circuits for manipulating optical information[J]. *Nanophotonics*, 2016, 6(3): 543-559.
- [8] Liang Y, Yu H, Wang H, et al. Towards integrated metadevices for terahertz silicon plasmonics: a review of recent progress[J]. *Chip*, 2022, 1(4): 100030.
- [9] Maier S A, Andrews S R, Martín-Moreno L, et al. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 176805.
- [10] Martín-Cano D, Nesterov M L, Fernández-Domínguez A I, et al. Domino plasmons for subwavelength terahertz circuitry[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 754-764.
- [11] Shen X P, Cui T J, Martín-Cano D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 40-45.
- [12] Zhang H C, Liu S, Shen X P, et al. Broadband amplification of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(1): 83-90.
- [13] Tang W X, Zhang H C, Ma H F, et al. Concept, theory, design, and applications of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(1): 1800421.
- [14] Gao X X, Zhang J J, Luo Y, et al. Reconfigurable parametric amplifications of spoof surface plasmons[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(17): 2100795.
- [15] García-Vidal F J, Fernández-Domínguez A I, Martín-Moreno L, et al. Spoof surface plasmon photonics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94(2): 025004.
- [16] Zhang Y, Xu Y H, Tian C X, et al. Terahertz spoof surface-plasmon-polariton subwavelength waveguide[J]. *Photonics Research*, 2017, 6(1): 18-23.
- [17] Su X Q, Xu Q A, Lu Y C, et al. Gradient index devices for terahertz spoof surface plasmon polaritons[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(12): 3305-3312.
- [18] Zhang X Q, Xu Q, Xia L B, et al. Terahertz surface plasmonic waves: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(1): 014001.

- [19] Xu Q A, Lang Y H, Jiang X H, et al. Meta-optics inspired surface plasmon devices[J]. *Photonics Insights*, 2023, 2(1): R02.
- [20] Lang Y H, Xu Q, Chen X Y, et al. On-chip plasmonic vortex interferometers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(10): 2200242.
- [21] Luque-González J M, Halir R, Wangüemert-Pérez J G, et al. An ultracompact GRIN-lens-based spot size converter using subwavelength grating metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(11): 1900172.
- [22] Yuan M R, Li Y F, Lu Y C, et al. High-performance and compact broadband terahertz plasmonic waveguide intersection[J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(10): 1811-1819.
- [23] Wan X, Shen X P, Luo Y, et al. Planar bifunctional Luneburg-fisheye lens made of an anisotropic metasurface [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): 757-765.